УДК 528.56

В. Н. КОНЕШОВ, В. Б. НЕПОКЛОНОВ, В. Н. СОЛОВЬЕВ

СРАВНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ АНОМАЛИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКИМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ ПРИ ТРАНСКОНТИНЕНТАЛЬНОМ ПЕРЕЛЕТЕ

В работе описаны методические особенности и приведены результаты гравиметрических исследований над территорией России по широте 60 градусов от Архангельска до Камчатки. Выполнены сравнения аэрогравиметрических измерений, полученных с помощью гравиметров, установленных на самолете-лаборатории, с данными современных моделей аномалий гравитационного поля Земли EGM2008 и EIGEN-6C3. Показано, что наибольшие погрешности современные модели имеют в районе прибрежных геотектонических структур Камчатского полуострова.

Изучение гравитационного поля Земли (ГПЗ) является актуальной фундаментальной и прикладной задачей. Аномалии силы тяжести (АСТ) используются для выявления плотностных неоднородностей и геотектонических структур, являющихся целевыми объектами разведочной геофизики; для расчетов УОЛ при внесении поправок при работе инерциальных навигационных систем надводных и подводных судов, а также при расчетах траекторий космических аппаратов, для уточнения фигуры Земли и глубинного строения земной коры. Возможность использования данных АСТ в качестве источника геофизической информации во многом определяется точностью этих данных при решении конкретной задачи.

Степень изученности аномалий гравитационного поля на территории России недостаточная. Есть труднодоступные районы, на которые карты АСТ не составлены. В последнее время появилось несколько современных моделей АСТ, составленных по данным альтиметрии и спутниковым градиентометрическим измерениям (CHAMP, GRACE, GOCE). Предполагается, что методы спутниковых наблюдений позволяют исследовать особенности ГПЗ в низкочастотном спектре гармоник.

Необходимо оценить достоверность моделей и степень их погрешностей для труднодоступных районов. Единственная возможность – это выполнить контрольные гравиметрические профили или контрольную площадную аэрогравиметрическую съемку [1, 2]. С этой целью ИФЗ РАН выполнил контрольный гравиметрический профиль от Архангельска до Петропавловска-Камчатского (треть длины окружности Земли по параллели 60° с. ш.) и площад-

Конешов Вячеслав Николаевич. Доктор технических наук, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН» (Москва). Действительный член Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Непоклонов Виктор Борисович. Доктор технических наук, проректор по научной работе Московского государственного университета геодезии и картографии.

Соловьев Владимир Николаевич. Старший научный сотрудник ИФЗ РАН.

ную гравиметрическую съемку в переходной зоне океан−континент на акватории Тихого океана.

Процесс сравнения аэрогравиметрических измерений с моделями ГПЗ состоял из следующих этапов:

− выбор подходящих «эталонных» ГПЗ;

− вычисление модельных значений АСТ на высотах съемки;

− сравнение измеренных и модельных значений АСТ, анализ полученных расхождений.

Выбор моделей аномалий гравитационного поля Земли

В качестве «эталонных» моделей использовались современные глобальные модели ГПЗ высокой точности и пространственного разрешения в виде ультравысокостепенного разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям, рекомендованные к использованию Международным центром по глобальным моделям Земли – International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [3]:

модель EGM-2008 до 2190-й степени разложения;

модель EIGEN-6C2 до 1949-й степени разложения;

модель EIGEN-6C3 до 1949-й степени разложения.

Особое место в этом ряду занимает модель EGM-2008 [4], созданная при ведущей роли Национального агентства геопространственной разведки США на замену базовой модели EGM-96 до 360-й степени.

Цель создания этой ультравысокостепенной модели − доведение точности определения высот геоида до уровня среднеквадратической погрешности 0,15 м, что в несколько раз превышает точностные характеристики модели EGM96. Низкочастотная часть модели EGM-2008 формировалась на базе использования новой на тот период спутниковой модели геопотенциала ITG-GRACE03S до 180-й степени (2007 г.), полученной на основе измерительной информации системы GRACE. Высокочастотная составляющая ГПЗ уточнялась за счет существенного обновления и дополнения исходных АСТ по трапециям 5×5' и методического повышения точности их обработки.

Для модернизации каталога средних АСТ по трапециям 5×5' были использованы ранее недоступные данные на территории России, основанные на гравиметрических картах масштаба 1:1000000, данные Европейского, Азиатского, Арктического и других международных гравиметрических проектов. Кроме этого, использовались уточненные значения АСТ в Мировом океане, полученные из обработки данных спутниковой альтиметрии с использованием новой модели динамической топографии морской поверхности. В итоге гравиметрическая изученность Земли по трапециям 5×5' была повышена по сравнению с предшествующими моделями с 65% примерно до 90%. Не обеспеченными исходной гравиметрической информацией остались только Антарктида и отдельные районы на территории Африки и Южной Америки. Эти районы были заполнены с использованием статистического прогноза, а также, что касается Антарктиды, данных обработки межспутниковых измерений в системе GRACE. Повышению точности обработки исходных АСТ способствовало использование глобальной цифровой модели рельефа 30×30". Эта цифровая модель рельефа уточнена при использовании космической информации, особенно в проблемных районах Африки, Южной Америки и Антарктиды.

В качестве одной из альтернативных моделей по отношению к модели EGM-2008 в данной статье рассматривалась модель EIGEN-6C. К особенностям этой модели можно отнести то, что это была фактически первая в мировой практике ультравысокостепенная модель ГПЗ, полученная с использованием градиентометрической информации европейского спутника GOCE. В комбинации с ней в качестве исходной информации модели EIGEN-6C использовались данные лазерных наблюдений спутников LAGEOS (1, 2) за 25 лет, данные межспутниковых измерений в системе GRACE, данные глобальной цифровой модели АСТ на равномерной сетке меридианов и параллелей с шагом 1′ Центра космических исследований Дании DTU10 [5]. Узловые значения АСТ модели получены в океане – по данным спутниковой альтиметрии; на суше – по глобальной модели геопотенциала EGM-2008. В дополнение к модели EGM-2008 авторы использовали ультравысокостепенные модели EIGEN-6C2 и EIGEN-6C3, представляющие собой дальнейшее развитие моделей семейства EIGEN-6C.

Для низкостепенных (до 50-й степени) коэффициентов модели EIGEN-6C2, как и аналогичных коэффициентов модели EIGEN-6C, предусмотрено введение поправок, обеспечивающих учет временных вариаций планетарной части геопотенциала

$$C(t) = C(t_0) + \underbrace{A_0 \Delta t + \sum_{i=1}^{2} \left(A_i \cos \omega_i \Delta t + B_i \sin \omega_i \Delta t \right)}_{\Delta C(\Delta t)}, \tag{1}$$

где C– параметр модели; ΔC – поправка за влияние динамической части модели; t_0 – начальная эпоха ($t_0 = 2005{,}0$); Δt – интервал прогноза; A_0 – линейный коэффициент прогноза; A_1, B_1 – годовые амплитуды; A_2, B_2 – полугодовые амплитуды; ω_1, ω_2 – угловые частоты годовых и полугодовых вариаций.

Детальная исходная информация о гравитационных аномалиях, использовавшаяся при выводе моделей EIGEN-6C2 и EIGEN-6C3, была представлена не только АСТ, но и высотами геоида, в обоих случаях имевшими шаг 1′. Источником исходной информации о высотах геоида и АСТ служила разработка Центра космических исследований Дании – глобальная цифровая модель гравитационного поля DTU12. Исходные значения АСТ и высот геоида в составе этой модели были получены в океанах (путем обработки данных спутниковой альтиметрии с использованием уточненных алгоритмов) и на суше (путем вычисления по глобальной модели геопотенциала EGM-2008 до 2190-й степени).

Основные отличия модели EIGEN-6C3 от модели EIGEN-6C2:

– содержит только статическую часть (при сравнении с данными аэрогравиметрии динамическая часть модели EIGEN-6C2 не учитывалась);

– получена с использованием данных GRACE и GOCE в виде гармонических коэффициентов соответственно до 180-й и 235-й степени и порядка, тогда как модель EIGEN-6C2 – до 130-й и 210-й степени.

– при выводе модели EIGEN-6C3 использовался существенно больший объем первичной информации спутника GOCE, выраженный в суточных дугах.

Сравнительные характеристики моделей EGM-2008, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3 по расхождениям с высотами геоида, полученными в пунктах постоянного спутникового наблюдения (нивелирования) на территории США, Австралии,

Канады, Европы, подтверждающие обоснованность выбора их в качестве «эталонных» моделей, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Среднеквадратические отклонения модельных высот геоида от данных спутникового нивелирования, см

Регион	Количество пунктов	Модель		
		EGM-2008	EIGEN-6C2	EIGEN-6C3
США	6169	24,6	24,7	24,5
Австралия	201	21,5	21,3	21,1
Канада	1930	12,8	12,7	12,6
Европа	1234	20,7	21,1	21,0

Сравнение данных моделей АСТ и результатов аэрогравиметрических измерений проводилось следующим образом. Полученный профиль на высоте полета невозможно пересчитать на эллипсоид в рамках решения обратной (некорректной) задачи гравиметрии. По этой причине для выполнения сравнения полученного профиля на высоте полета данные моделей АСТ пересчитывались на высоту полета (решалась прямая корректная задача гравиметрии).

При проведении сравнения с данными аэрогравиметрии модельные значения АСТ на заданных высотах вычислялись по формуле

$$\Delta g(\varphi,\lambda,r)=\frac{fM}{r^2}\sum_{n=2}^{N}\left(\frac{a}{r}\right)^n(n-1)\sum_{m=0}^{n}\overline{P}_{nm}(\sin\varphi)(\overline{C}_{nm}\cos m\lambda+\overline{S}_{nm}\sin m\lambda)\,, \qquad (2)$$

где a – большая полуось ОЗЭ; φ,λ,r – сферические геоцентрические координаты (широта, долгота, радиус-вектор) точки; fM – произведение гравитационной постоянной на массу Земли; $\overline{P}_{nm}$ – нормированные присоединенные функции Лежандра; $\overline{C}_{nm},\overline{S}_{nm}$ – нормированные коэффициенты разложения возмущающего потенциала по сферическим функциям; N – предел суммирования; γ – нормальное ускорение силы тяжести.

Функции Лежандра определяются согласно рекуррентным формулам [6]:

$$\left.\begin{aligned}
&\overline{P}_{00}=1\\
&\overline{P}_{11}=\sqrt{3}\cos\varphi\\
&\overline{P}_{nn}=\mu_1\cos\varphi\overline{P}_{n-1,n-1}\\
&\overline{P}_{n,n-1}=\mu_2\sin\varphi\overline{P}_{n-1,n-1}\\
&\overline{P}_{nm}=\mu_3\left(\mu_4\sin\varphi\overline{P}_{n-1,m}-\mu_5\overline{P}_{n-2,m}\right)
\end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

где коэффициенты $\mu_1,\ldots,\mu_5$ имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\mu_1=\sqrt{\frac{2n+1}{2n}}\\
&\mu_2=\sqrt{2n+1}\\
&\mu_3=\sqrt{\frac{2n+1}{(n-m)(n+m)}}\\
&\mu_4=\sqrt{2n-1}\\
&\mu_5=\sqrt{\frac{(n-m-1)(n+m-1)}{2n-3}}
\end{aligned}\right\}. \qquad (4)$$

Геоцентрические координаты φ, λ соответствовали выражениям: $\mathrm{tg}\varphi = (1-e^2)\mathrm{tg}B$, $\lambda = L$, где B, L – геодезические широта и долгота определяемой точки, рад; e^2 – квадрат первого эксцентриситета ОЗЭ.

Расчеты по формуле (2) выполнялись с помощью модифицированной программы гармонического синтеза (ПГС), разработанной ИФЗ РАН. Особенность данной программы в том, что расчеты могут выполняться на различных высотах как в отдельных точках, так и в узлах равномерной сетки. В последнем случае расчеты осуществляются с помощью эффективного вычислительного алгоритма с использованием быстрого преобразования Фурье. Модифицированный вариант программы настроен на работу с глобальными моделями ГПЗ в новом формате GFC, разработанном и введенном в обращение под эгидой Международного центра глобальных моделей Земли. Описание данного формата приведено в работе [7].

После получения трансконтинентального профиля было проведено сравнение значений аномалий в свободном воздухе (АСВ), измеренных аэрогравиметрическими комплексами в 2013 г. со значениями АСВ, вычисленными по двум современным моделям гравитационного поля Земли: EGM2008 степени 2190 и EIGEN-6C3 степени 1949.

Состав аппаратуры самолета-лаборатории и оценка точности аэрогравиметрических измерений

Проведение эрогравиметрических измерений в виде профилей и площадной гравиметрической съемки в ИФЗ РАН с 2006 г. осуществляется самолетом-лабораторией АН-26 БРЛ (рис. 1). В 2013 г. измерения проводились тремя инерциальными аэрогравиметрическими комплексами типа GT-2A.

Рис. 1. Самолет-лаборатория на базе АН-26 БРЛ на стоянке

Каждый комплекс получал сигнал от отдельного GPS-приемника, подключенного к своей антенне. Помимо этого, самолет-лаборатория был оборудован специальным приемником, подключенным к четырем разнесенным антеннам. Это позволяло по сигналам системы GPS вырабатывать значения углов курса, крена и тангажа. Самолет-лаборатория был оборудован также специальной системой самолетовождения, имел тройное резервирование линий электропитания комплексов GT-2A и оборудован отдельным термостатированным помещением гравиметрической лаборатории.

Оценка инструментальных погрешностей аэрогравиметрических гравиметров при выполнении трансконтинентального профиля (СКП) выполнялась по внутренней сходимости их показаний и не превышала 0.5 мГал. По возвращении в Архангельск трансконтинентальный профиль на ряде участков выполнялся в виде возвратного профиля с теми же координатами, но обратным курсом. По этим данным оценка СКП гравиметрических измерений не превысила 0.82 мГал.

Следует отметить, что прямой и обратный перелеты выполнялись при отсутствии больших фугоидных помех. По результатам аэрогравиметрической съемки над акваторией Тихого океана и прибрежными геотектоническими структурами Камчатского полуострова построена карта АСТ в масштабе 1:200000. Погрешность съемки по величине невязок значений АСТ в точках пересечений профилей составила 0.66 мГал. При получении карты АСТ выполнен пересчет результатов площадной съемки, полученной на высоте полета самолета, на поверхность эллипсоида (решена обратная задача гравиметрии). Результатом сравнения данных аэрогравиметрической съемки на одном из участков площади работ с результатами морской гравиметрической съемки является величина невязок значений АСТ в точках пересечения профилей каждой из съемок. При этом оценка СКП гравиметрической съемки составила 0.78 мГал.

Результаты сравнения измеренных и модельных значений АСВ

Сравнение модельных и измеренных значений АСВ проводилось как на маршрутных профилях при перелете из аэропорта Архангельска до аэропорта Петропавловска-Камчатского и обратно (это треть планеты по широте 60° с. ш.), так и при выполнении площадной съемки в резкоаномальном районе переходной зоны «океан−континент» в Тихом океане.

Для сравнения с модельными АСВ использовались измерения аэрогравиметрическими комплексами, выполненные на маршрутных галсах; в значения измеренных АСВ вводилась только поправка за нормальный вертикальный градиент гравитационного поля, равный 0.3086 мГал/м, поправки за аналитическое продолжение вниз не вводились. Средняя высота полета на перелетах между указанными выше аэропортами составила 4494 ±114 м.

Модельные значения АСВ вычислялись в виде нескольких грид-файлов с шагом 1 мин по широте и долготе, для значений высоты 4100, 4500, 4900 м.

В целях выяснения степени изменения модельных АСВ с высотой из значений модельного грид-файла, вычисленного для высоты 4100 м, были вычтены значения модельного грид-файла, вычисленного для высоты 4900 м. Среднее расхождение значений этих грид-файлов составило -0.01 мГал, а среднеквадратическое отклонение (СКО) составило ±0.56 мГал. Минимальное значение расхождения -2.8 мГал, максимальное +3.5 мГал. Такие расхождения в несколько миллигал наблюдаются только в местах с короткопериодными высокоамплитудными экстремумами поля, и они мало влияют на значение среднего расхождения. На этом основании сделан вывод, что отклонения высоты полетов на отдельных галсах до ±100 м от средней высоты 4500 м к заметным статистическим искажениям в расхождениях измеренных и модельных АСВ не приведут.

В связи с тем что измеренные значения АСВ вычислялись с нормальным полем Гельмерта «минус» 14 мГал, в грид-файлы с модельными значениями АСВ была введена поправка за переход с нормального поля системы WGS84 в нормальное поле Гельмерта «минус» 14 мГал.

Сравнение измеренных и модельных АСВ проводилось следующим образом. В таблице по геодезическим координатам пунктов галсов проводилась интерполяция модельных значений АСВ из соответствующих грид-файлов для высоты 4500 м. В отдельных колонках таблицы вычислялись невязки (разности) между измеренными и модельными значениями. По этим колонкам для отдельных галсов или групп галсов (полетов) определялись статистические параметры: среднее значение невязки и СКО (табл. 2).

Таблица 2

Статистическое сравнение измеренных и модельных АСВ

Номер п/п	Наименование	Количество пунктов сравнения	Модель EGM2008 (N_{max} = 2190)		Модель EIGEN-6C3 (N_{max} = 1949)	
			Средняя невязка, мГал	СКО, мГал	Средняя невязка, мГал	СКО, мГал
1	Перелет Архангельск – Сургут	10154	+1.77	2.87	+1.66	2.86
2	Перелет Сургут – Мирный	17058	-5.02	2.29	-5.40	2.32
3	Перелет Мирный – Петропавловск-Камчатский. Профили: 1, 2, 3	23923	+3.86	7.75	+4.33	6.83
	Профиль 1	15371	+1.45	7.73	+2.35	7.19
	участок 1a	5991	-3.13	5.14	-2.25	4.38
	участок 1b	2740	-0.21	2.95	+1.78	2.67
	участок 1c	6640	+6.28	8.21	+6.73	7.80
	Профиль 2	3811	+5.01	3.29	+5.91	2.22
	Профиль 3	4741	+10.74	5.81	+9.53	4.69
4	Перелет Петропавловск-Камчатский – Магадан	6480	+8.21	3.22	+7.50	3.01
5	Перелет Магадан – Мирный	15904	+1.72	7.80	+2.49	7.35
	Профиль 1	6302	+6.99	8.19	+7.52	7.75
	Профиль 2	2581	+1.31	2.40	+3.42	2.20
	Профиль 3	7021	-2.86	5.44	-2.35	4.52
6	Перелет Мирный – Сургут	20943	-7.43	2.34	-7.76	2.46
7	Перелет Сургут – Архангельск	14410	-0.93	4.22	-0.71	4.10

Результаты таблицы и приведенные ниже рисунки позволяют сделать следующие выводы:

– данные моделей EGM2008 степени 2190 и EIGEN-6C3 степени 1949 на широте 60° с. ш. на всех перелетах Архангельск – Петропавловск-Камчатский практически совпадают; следовательно, для этой широты можно говорить об их идентичности;

– на маршруте Архангельск – Сургут и обратно полученные оценки достоверно показали, что данные моделей более сглажены по отношению к результатам аэрогравиметрических измерений (рис. 2, *а*);

– на участке Сургут – Мирный (туда и обратно, пп. 2 и 6) видно, что данные моделей обладают систематической погрешностью по отношениям к значениям, полученным по результатам аэрогравиметрических измерений (рис. 2, *б*). В ряде случаев эта погрешность достигает 8–10 мГал (пп. 3 и 4).

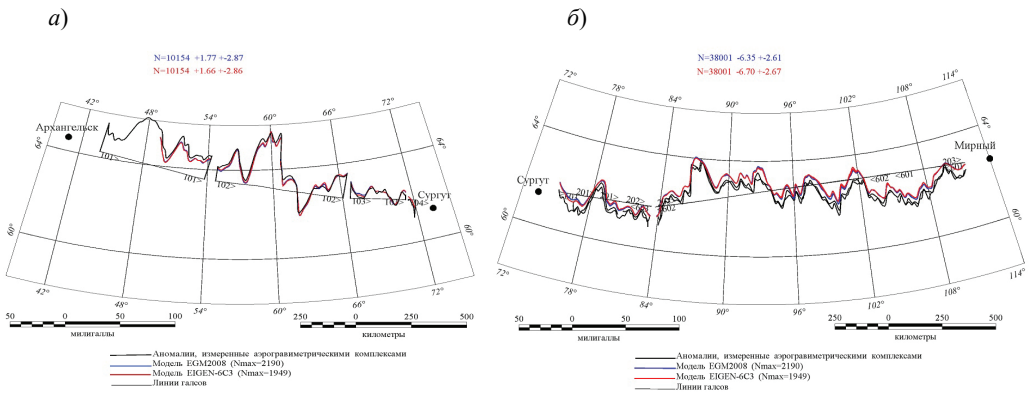

Рис. 2. Сравнение данных моделей EGM2008 и EIGEN-6C3 с результатами аэрогравиметрических измерений на участках Архангельск – Сургут (*а*) и Сургут – Мирный (*б*)

После выполнения ИФЗ РАН аэрогравиметрической съемки над акваторией Тихого океана и прибрежными геотектоническими структурами Камчатского полуострова получена оценка погрешностей моделей EGM2008 и EIGEN-6C3 для резкоаномального района перехода «океан – континент». Результаты оценки сравнения значений АСТ в виде разностей значений моделей и измеренных значений приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, погрешности моделей в этом резкоаномальном районе достигают 30 мГал.

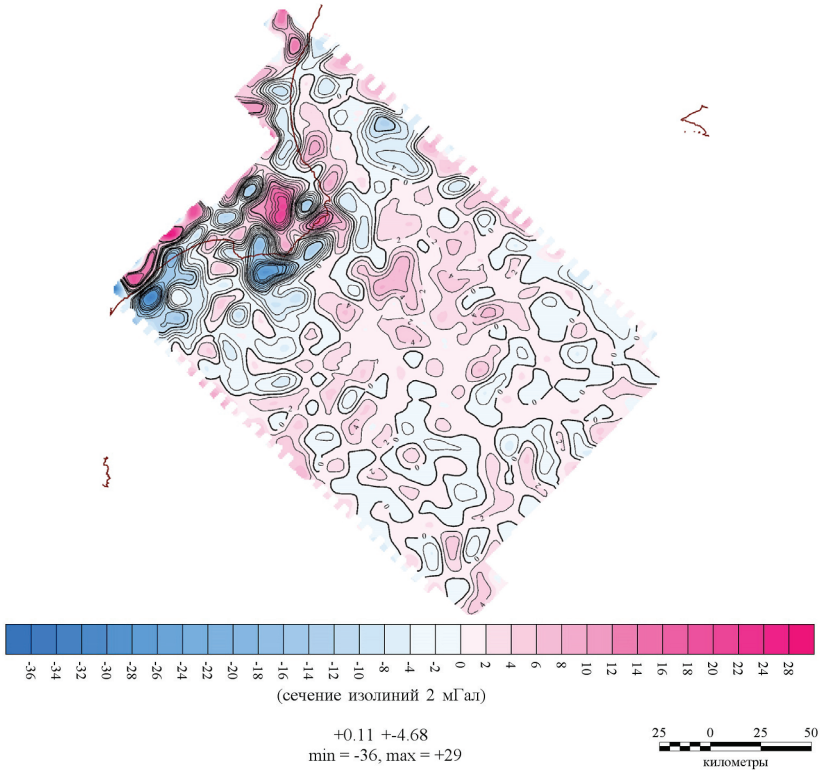

Рис. 3. Сравнение данных моделей EGM2008 и EIGEN-6C3 с результатами аэрогравиметрических измерений в районе перехода «океан – континент» в Тихом океане

Выводы

Выполненные работы наглядно показали, что современные модели EGM2008 и EIGEN-6C3 отображают характер АСТ в труднодоступных районах России (профиль Мирный – Магадан), но в то же время названные модели не свободны от погрешностей. Проведенные исследования выявили характер этих погрешностей и их значение. Доказано, что максимальная величина погрешностей была получена в переходной резкоаномальной зоне «океан–континент». В качестве инструмента проверки погрешностей современных моделей АСТ была использована профильная и площадная аэрогравиметрическая съемка и предложены методические приемы пересчета вверх и вниз моделей АСТ и данных аэрогравиметрической съемки для корректного сравнения моделей АСТ и результатов аэрогравиметрических измерений.

Исследования выполнены при поддержке Программы Президиума РАН 44П "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации" на 2014 г., Проект "Аэрогравиметрическая съемка в высоких широтах Арктики".

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рожков Ю.Е., Дробышев Н.В., Конешов В.Н., Погорелов В.В., Соловьев В.Н.** Особенности методики аэрогравиметрической съемки, проводимой в высоких широтах // Физика Земли.- 2009.- № 8.- С. 36-41.
2. **Дробышев Н.В., Конешов В.Н., Клевцов В.В., Соловьев В.Н.. Лаврентьева Е.Ю.** Создание самолета-лаборатории и методики работ для выполнения аэрогравиметрической съемки в арктических условиях // Сейсмические приборы.- 2009.- Т. 44.- № 3.- С. 5-19.
3. **Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Столяров И.А.** Об использовании современных моделей геопотенциала для исследования уклонений отвесных линий в Арктике // Гироскопия и навигация.- 2012.- №2.- С. 44-55.
4. **Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K.** An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008 / EGU General Assembly 2008 – Vienna, Austria, April 13-18, 2008.
5. **Andersen, O. B.** The DTU10 Gravity field and Mean sea surface (2010), Second international symposium of the gravity field of the Earth (IGFS2), Fairbanks, Alaska.
6. **Rapp R.H.** A Fortran Program for the Computation of Gravimetric Quantities from High Degree Spherical Harmonic Expansions // Rep. Dep. Geod. Science and Surveying, OSU.– N 334 – Columbus, 1982. – 22 p.
7. **Barthelmes F., Förste C**. The ICGEM-format / GFZ Potsdam, Department 1 “Geodesy and Remote Sensing”, 7. June 2011.

Abstract. The article describes the gravimetric survey conducted in Russia at 60 deg latitude from Archangelsk to Kamchatka, considers the features and results of the research. Airborne gravity data from gravimeters installed in air laboratories are compared with the modern Earth gravitational models EGM2008 and EIGEN-6C3. It is shown that modern models have maximum errors near the inshore geotectonic structures of Kamchatka peninsula.

Key words: airborne gravity measurements, gravimeters, geotectonic structures, Earth gravity field

Материал поступил 24.04.14